

## 시나리오 지진에 대한 철골구조물의 지진응답 평가 실험 Seismic Response Test of Steel Frame Structure Subjected to Scenario Earthquakes

최인길, 김민규, 전영선, 서정문

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 105호

### 요 약

본 연구에서는 철골 구조물 모델에 대한 지진응답을 진동대 시험을 통하여 평가하였다. 이 시험에서는 확률론적 지진재해도에 근거한 시나리오 지진 및 대만 Chi-Chi 지진에서 기록된 근거리 지진에 의한 구조물 모델의 응답을 원전 설계기준 지진에 의한 응답과의 비교를 통하여 구조물의 응답 및 상부의 층응답에 대하여 평가하였다. 본 실험에서는 4층 철골 프레임 구조물을 설계 제작하여 사용하였다.

### ABSTRACT

Shaking table tests on the seismic behavior of a steel frame structure model were performed. The purpose of this test is to estimate the effect of a near-fault ground motion and the scenario earthquake based on the probabilistic seismic hazard analysis on the nuclear power plant structures. Three kinds of earthquake ground motions which represent the design earthquake ground motion for the Korean nuclear power plants, the scenario earthquakes for the Korean nuclear power plant sites and the near-fault earthquake record from the Chi-Chi earthquake were used as the input motion. A 4-story steel frame structure was fabricated to perform the tests.

### 1. 서론

우리나라 원전 구조물의 설계에는 미국 NRC Regulatory Guide 1.60[1]에서 제시하고 있는 표준 설계응답 스펙트럼을 SSE(Safe Shutdown Earthquake)의 최대지반가속도 값으로 스케일링 하여 사용하고 있다. 그러나 최근 월성 원전 부근에서 위치한 단층의 활성 여부에 대해 많은 논란이 되고 있으며 이들 단층에 대한 조사 및 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 이들 단층이 활성으로 판명될 경우 주변에 위치한 원전 구조물 및 기기들에 대한 내진안전성의 재평가는 불가피하며 이에 대해 대비할 필요가 있다. 특히 최근

들어 부지와 가까운 주변 단층에서 발생하는 근거리 지진에 대한 관심이 고조되고 있으며 이에 대한 많은 연구가 지진 다발국가를 중심으로 활발히 진행되고 있으며 근거리 지진에 의한 원전 구조물에 미치는 영향을 평가하기 위한 연구가 국제공동연구로 진행되고 있다.

근거리 지진이라 함은 약 10 km 이내의 근거리에 위치한 단층으로부터 발생한 지진을 의미하며 이러한 지진은 지진 발생 초기에 장주기 특성을 갖는 큰 속도 펄스를 가지는 특성을 보여주고 있다. 이는 단층의 활동으로 인해 발생하는 지진파의 특성으로 최대지반가속도에 비해 최대지반 속도가 매우 크게 나타난다. 최근 발생한 고베지진이나 Chi-Chi 지진과 같은 근거리 지진에 의해 큰 피해가 발생하였으며 내진설계가 된 구조물에서도 큰 피해가 발생하여 근거리 지진에 대한 관심이 고조되기 시작하였다.

또한 우리나라 원전의 경우 표준응답 스펙트럼을 사용하여 설계하여 왔으며 이는 우리나라의 지진학 및 지질학적 특성을 고려하지 못하고 있다. 최근 미국에서는 NRC Regulatory Guide 1.165[2]를 제안하고 확률론적 지진재해도 분석 결과에 근거한 입력지진의 설정이 권장되고 있다. 우리나라의 경우 가동중 및 신규 원전에 대한 확률론적 지진위험도 평가의 일환으로 대부분의 원전 부지에 대한 확률론적 지진재해도 분석이 완료된 상태에 있다. 따라서 확률론적 지진재해도 결과에 근거한 지진에 대한 원전 구조물 및 기기의 안전성 평가가 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 4층 철골 구조물을 이용하여 확률론적 지진재해도(Probabilistic Seismic Hazard)에 근거한 시나리오지진, 근거리 지진 및 설계지진에 의한 구조물의 응답과 기기의 설계 및 내진안전성 평가에 사용되는 층응답을 진동대 시험을 통하여 평가하였다.

## 2. 실험모델

### 2.1 모델설계

일반적으로 대부분의 원전 내 구조물의 경우 4 - 10 Hz의 고유진동수를 가지고 있다. 본 연구에서는 원전 프리스트레스 격납건물을 목표 구조물로 설정하여 실험 모델을 설계하였다. 표준형 원전 프리스트레스 콘크리트 격납건물의 고유진동수는 약 4.7Hz이다. 격납건물의 지진응답 평가를 위해서는 콘크리트 축소모델을 제작하여 실험하는 것이 가장 합리적이거나 비용 및 실험기간을 고려하여 고유진동수가 유사한 철골 구조물을 이용하여 실험을 수행하였으며 입력지진동의 주파수 성분에 따른 구조물의 응답을 실험적으로 평가하였다.

그림 1에 실험에 사용한 철골 구조물의 제원을 보여주고 있으며, 그림 2는 제작이 완료되어 실험을 수행하기 위해 진동대에 설치된 모습을 보여주고 있다. 모델 제작에 사용된 부재의 재료 및 제원을 표 1에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 모델의 기둥은 강파이프(Steel Pipe)를 사용하였으며 각 층의 슬래브(Slab)는 강판(Steel Plate)을 사용하여 제작하였다. 기둥과 슬래브의 연결은 6개의 고장력볼트(High-Tension Bolt)를 이용하여 고정하였다. 슬래브의 두께 및 기둥 부재의 직경과 두께는 목표진동수를 확보할 수 있도록 예비해석을 통하여 산정하였다.

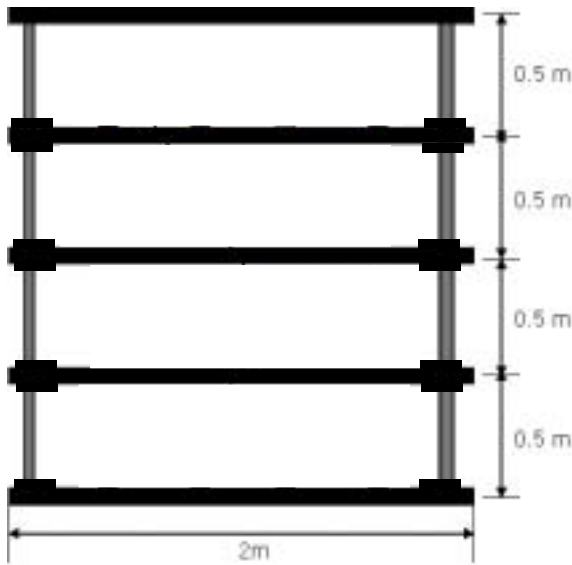


그림 1. 실험모델의 제원



그림 2. 실험모델 사진

표 1. 실험모델의 재료 및 제원

| Member                 | Specification                  | Dimension (cm)      |
|------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Column                 | Steel Pipe                     | OD : 4.27, t : 0.36 |
| Slab                   | Steel Plate                    | 200x120x4           |
| Slab-Column Connection | High-Tension Bolt at End Plate |                     |

## 2.2 고유진동수 해석

설계 및 제작이 완료된 모델의 고유진동수를 검증하기 위하여 아래의 그림 3과 같은 해석모델을 이용하여 고유치해석을 수행하였다. 해석모델에서는 슬래브는 하나의 판요소로 모델링 하였으며 각각의 기둥은 보요소를 사용하여 모델링 하였다. 실험모델에 대한 고유치해석 결과 고유진동수가 4.7Hz로 나타나 목표진동수를 확보하였음을 확인할 수 있었다.

## 3. 입력지진의 선정

본 연구에서는 3 세트의 입력지진동을 선정하여 실험을 수행하였다. 먼저 원진 구조물의 설계에 사용된 US NRC Regulatory Guide 1.60[1]의 표준응답 스펙트럼을 포괄하는 수평 2성분 및 수직 1성분의 인공지진가속도 시간이력을 작성하였다.

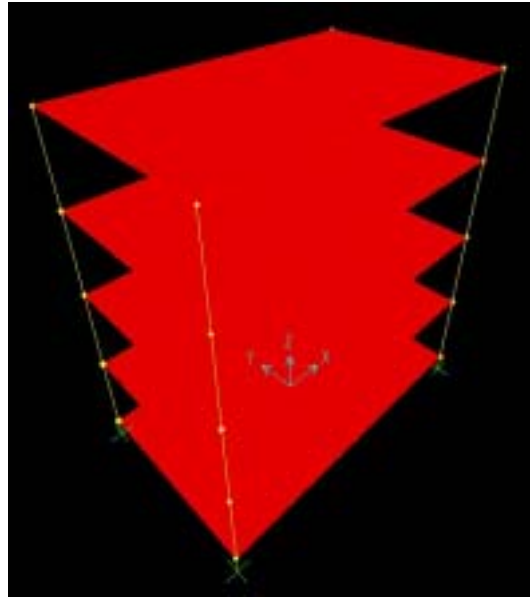
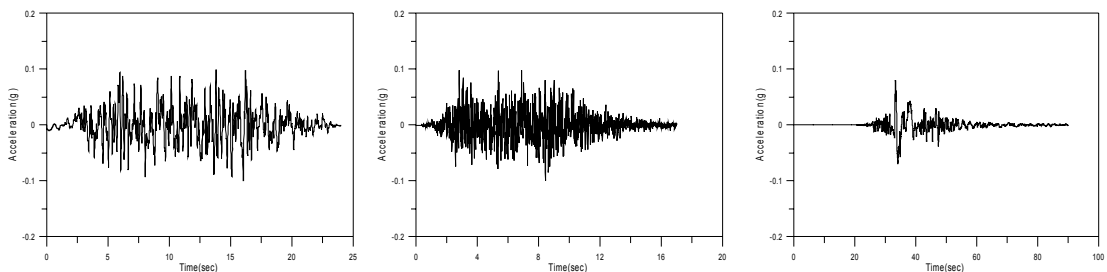


그림 3. 해석모델

또한 국내 원전부지의 확률론적 지진재해도 분석결과로부터 산정한 확률론적 시나리오 지진의 규모와 진앙거리에 대해 확률론적 지진재해도 평가 시에 사용한 지반운동 감쇄식을 이용하여 지반응답 스펙트럼을 작성하고 이 스펙트럼을 포괄하는 3방향의 인공지진가속도 시간이력을 작성하였다. 지진재해도의 재분해에 의해 산정된 원전부지의 시나리오 지진은 (M6.4, 9km) 이다[3]. 마지막으로 최근 대만에서 발생한 Chi-Chi 지진의 TCU 052 관측점에서 관측된 가속도 시간이력을 입력지진으로 사용하였다. 이는 실제 근거리 지진의 특성이 잘 나타나는 진을 이용하여 구조물의 응답에 미치는 근거리 지진의 영향을 평가하기 위함이다.

그림 4에 본 실험에서 사용한 3가지 입력지진의 수평성분 가속도 시간이력을 최대지반가속도 1g로 정규화 한 것을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Chi-Chi 지진의 기록에서는 초기 큰 펄스 형태의 지반운동을 뚜렷이 확인할 수 있으며 시나리오 지진에는 고진동수 성분이 많이 포함되어 있음을 알 수 있다.



(a) NRC

(b) Scenario

(c) Chi-Chi

그림 4. 입력 가속도 시간이력

3가지 입력지진동에 대한 응답스펙트럼을 방향성분별로 그림 5에서 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Chi-Chi 지진의 경우 1Hz 부근의 저진동수 영역에서 큰 값을 보여주고 있으며 시나리오 지진의 경우 30Hz 부근에서 첨두값을 보여주며 대체적으로 10Hz 이상의 고진동수 구간에서 설계지진에 비해 크게 증폭되는 것으로 나타났다. 설계지진의 경우 주요 원전구조물의 고유진동수가 위치하는 2 - 10Hz 구간에서 매우 큰 값을 보여주고 있다.

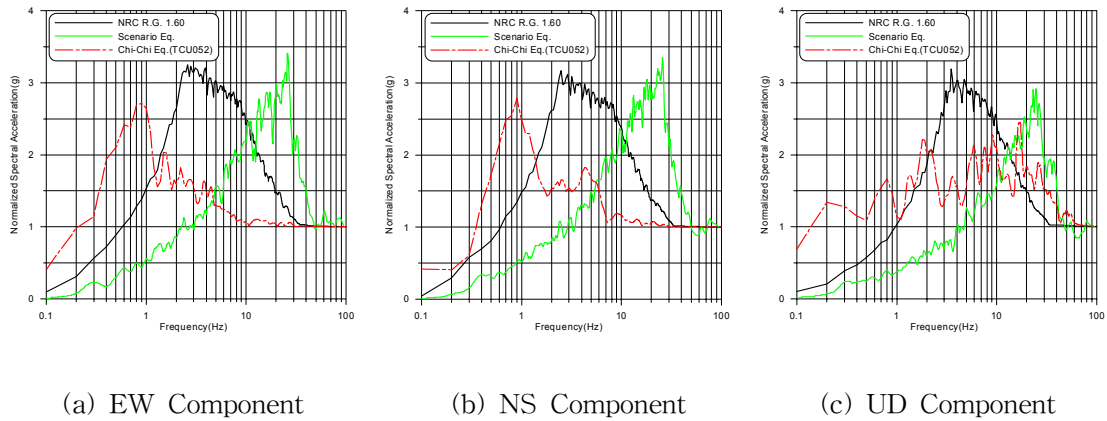


그림 5. 입력지진의 가속도 응답 스펙트럼

#### 4. 실험 및 결과분석

##### 4.1 실험절차 및 계측

시험에 사용한 진동대는 한국기계연구원에서 보유하고 있는 4m x 4m 크기의 6자유도 진동대이다. 실험을 위하여 제작된 모델을 진동대에 기둥과 슬래브의 연결방법과 동일하게 각 기둥마다 6개의 고장력 볼트를 이용하여 고정하였다.

진동대 실험 절차는 다음의 표 2와 같다. 먼저 모델의 고유진동수 추정을 위한 랜덤진동 시험을 수행하였다. 랜덤진동 시험에는 0.025g의 PGA를 갖는 백색잡음 입력을 이용하였다. 실제 실험에서는 모델의 고유진동수를 고려하여 응답이 작게 나타날 것으로 예상되는 입력지진 순으로 0.2g PGA의 입력 시험을 시작으로 점차 지진의 크기를 증가시켜 나갔으며 입력지진의 입력 순서도 수평 1방향, 수평 2방향, 수평 2방향 및 수직 방향 입력의 순서로 진행 하였다. 또한 각 단계 사이에 모델의 손상정도를 파악하기 위하여 랜덤진동 시험을 수행하였다.

지진입력에 대한 모델의 응답을 계측하기 위하여 12개의 가속도 센서와 1개의 LVDT를 이용하여 가속도 및 변위응답을 각각 측정하였다. 가속도 센서는 각 층에 3개씩 3방향 응답을 측정하였으며 LVDT는 2층 바닥에서의 변위응답을 측정함으로써 최대 변위가 발생하는 1층 기둥의 응답을 측정하였다. 또한 1층 기둥의 비선형 거동을 측정하기 위하여 변형률 게이지를 대각선 방향으로 두 기둥에 설치하였다.

표 3에 모델의 고유진동수 추정을 위한 랜덤진동 시험 결과와 예비해석으로부터 구한 고유진동수를 비교하여 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 1차 고유진동수에서 예비

해석결과와 약간 상이하게 나타나고 있으나 실험 목적에 크게 벗어나지 않는 것으로 판단된다. 2차 모드 이후의 고차 모드에서는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

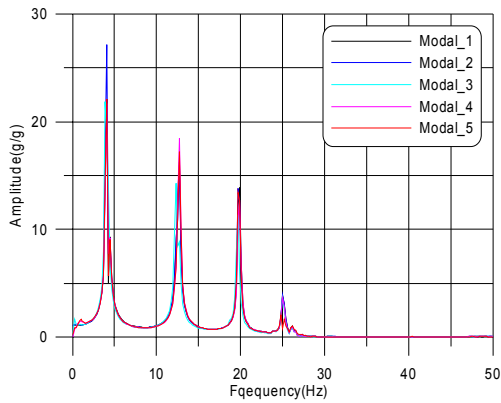
그림 6에서는 랜덤진동 시험으로부터 얻은 응답을 이용하여 전달함수 및 Phase Angle 을 산정하여 보여주고 있다. 그림에서 전달함수는 모든 랜덤진동 시험에 의한 값을 같이 보여주고 있는데 지진동 크기가 증가함에 따라 전달함수에서의 변화가 거의 없는 것으로 나타나 지진동에 의한 손상이 크지 않음을 알 수 있다.

표 2. 진동대 시험 순서

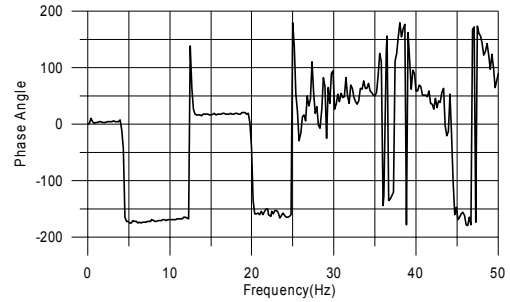
| Step | Input Motion | Direction | PGA (g) |
|------|--------------|-----------|---------|
| 1    | White Noise  | 3-D       | 0.05    |
| 2    | Chi-Chi      | 1-D       | 0.2     |
| 3    | Scenario     | 1-D       | 0.2     |
| 4    | NRC          | 1-D       | 0.2     |
| 5    | White Noise  | 3-D       | 0.05    |
| 6    | Scenario     | 1-D       | 0.5     |
| 7    | NRC          | 1-D       | 0.5     |
| 8    | White Noise  | 3-D       | 0.05    |
| 9    | Chi-Chi      | 2-D       | 0.2     |
| 10   | Scenario     | 2-D       | 0.2     |
| 11   | NRC          | 2-D       | 0.2     |
| 12   | White Noise  | 3-D       | 0.05    |
| 13   | Scenario     | 2-D       | 0.5     |
| 14   | NRC          | 2-D       | 0.5     |
| 15   | White Noise  | 3-D       | 0.05    |
| 16   | Scenario     | 3-D       | 0.5     |
| 17   | NRC          | 3-D       | 0.5     |
| 18   | White Noise  | 3-D       | 0.05    |

표 3. 시험 및 예비해석에 의한 고유진동수

| Mode No. | Frequency (Hz) |      |
|----------|----------------|------|
|          | Analysis       | Test |
| 1        | 4.7            | 4.1  |
| 2        | 13.7           | 12.7 |
| 3        | 21.5           | 19.9 |
| 4        | 27.0           | 25.0 |



(a) Transfer Function

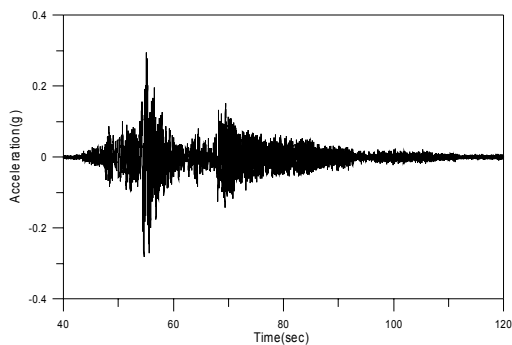


(b) Phase Angle

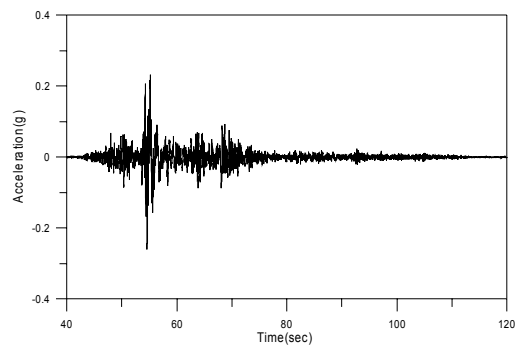
그림 6. 랜덤진동 실험으로부터 구한 전달함수 및 Phase Angle

#### 4.2 실험결과 분석

각각의 입력지진동에 대한 모델의 가속도 응답을 측정하기 위해 각 층마다 3개의 가속도 센서를 부착하여 3방향 응답을 모두 측정하였다. 아래의 그림 7은 1방향의 Chi-Chi 지진 입력 (0.2g)에 대한 가속도 응답의 측정결과와 해석결과를 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적인 응답이 매우 유사하게 나타났으나 시험에 의한 응답에 고진동수 잡음이 많이 포함되어 있음을 알 수 있으며 PGA(Peak Ground Acceleration)가 해석에 의한 값보다 크게 나타났다. 이는 0.2g의 지진입력을 진동대에 입력하였지만 기계적인 특성에 의해 정확하게 의도한 입력지진을 모사하지 못하여 의도한 입력에 비해 큰 입력으로 가진되었기 때문이다. 또한 진동수 성분에서도 약간의 차이가 있기 때문에 발생하는 것이다. 이와 같이 진동대에서 목표 입력을 정확하게 가진하지 못하기 때문에 입력과 응답의 절대적인 비교는 곤란하다. 이러한 이유로 일부 연구[4]에서는 유효 가속도 개념을 사용하기도 하나 이 방법은 지진동의 강진구간 등의 설정에 불확실성이 커 이를 이용한 비교 역시 효과적이라고 볼 수 없다.



(a) Test

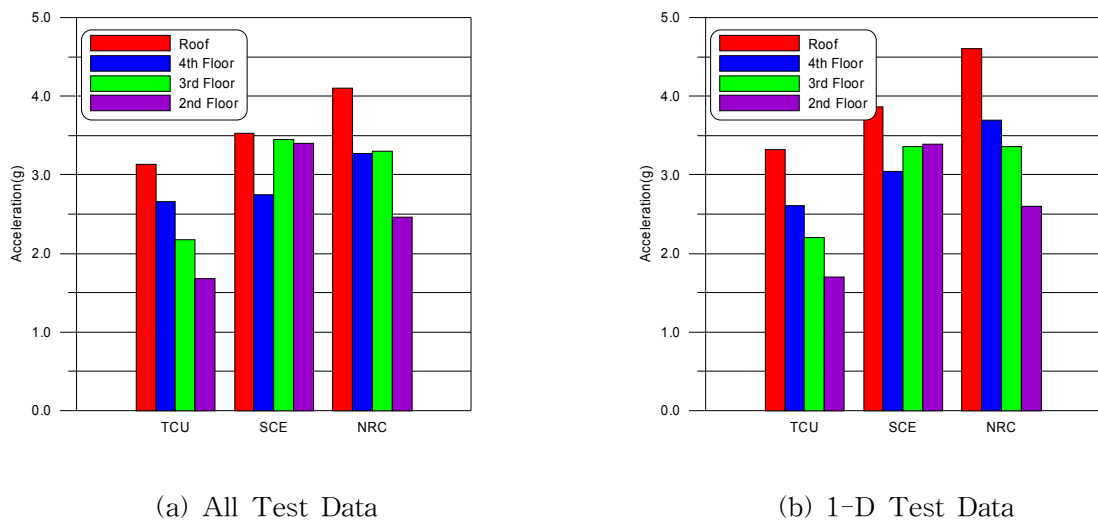


(b) Analysis

그림 7. 실험 및 해석에 의한 가속도 응답의 비교

본 연구에서는 입력지진동의 세기에 따른 최대응답을 비교하기 위하여 입력지진동의 세기로 1g로 정규화하여 응답을 비교하였다. 그림 8에는 전체 실험에서의 각 층에서의 최대응답의 평균 및 1-D 실험에서의 최대응답의 평균을 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 설계지진인 NRC 지진에 의한 응답이 대부분의 층에서 가장 크게 나타났다. 또한 1-D 시험 결과에 의한 평균 응답이 전체 응답의 평균에 비해 크게 나타났다. 이로 미루어 시험 모델과 같은 정형화된 구조물에서 3방향 가진에 의한 응답이 일방향 가진에 의한 응답에 비해 항상 크게 나타나는 것이 아님을 알 수 있다.

가속도 응답에 대한 계측으로부터 구조물의 고유진동수와 입력지진의 진동수 특성이 구조물의 가속도 응답에 매우 큰 연관성을 가짐을 알 수 있으며 이러한 관점에서 볼 때 원전 구조물의 경우 대부분 4-10Hz[5]의 범위 내에 있으므로 탄성한계 내의 거동에서는 근거리 지진에 의한 영향이 크지 않을 것이라는 것을 예측할 수 있다. 그러나 입력지진 강도가 커짐에 따라 구조물이 항복에 이르게 되면 유효진동수의 감소로 인해 근거리 지진의 영향을 크게 받을 우려가 있다.



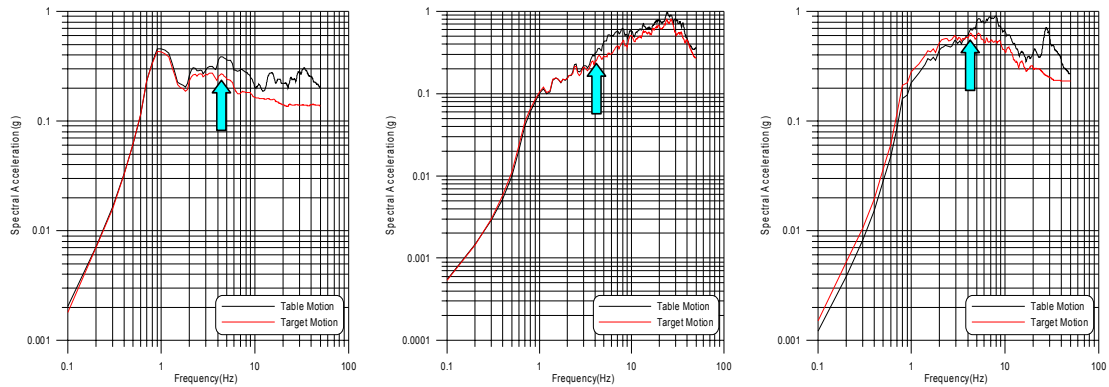
(a) All Test Data

(b) 1-D Test Data

그림 8. 1g로 정규화 된 입력지진에 대한 최대가속도 응답의 평균

시험 모델의 변위응답은 1층 기둥 상부에 설치한 LVDT를 이용하여 계측하였다. 앞서 기술한 바와 같이 진동대 입력의 오차로 인해 지진동 세기에 따른 변위응답의 직접적인 비교는 불가능하다. 구조물의 변위응답은 PGA 보다는 고유진동수에서의 스펙트럴 응답이 지배하게 됨에 따라 본 연구에서는 구조물 고유진동수에서의 스펙트럴 가속도 비를 이용하여 정규화한 후 변위응답을 비교하였다. 본 연구에서 사용된 모델의 1차 고유진동수에서의 모드 기여도는 약 88%로 전체적인 응답의 평가에 충분한 기여도를 가지고 있다. 그림 9에 0.2g PGA의 1-D 실험에서의 목표 입력운동 및 진동대 운동의 응답스펙트럼을 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 화살표는 구조물의 1차 고유진동수를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 NRC 지진의 경우 목표 입력운동이 작게 입력되었음을 알 수 있으며 전체적으로 ZPA(Zero Period Acceleration)에 비해 작게 입력되었음을 알 수 있다.





(a) Chi-Chi

(b) Scenario

(c) NRC

그림 9. 목표 입력운동과 진동대 운동의 응답스펙트럼 비교

표 4에서는 실험에서 측정된 변위, PGA를 이용하여 정규화한 변위 및 스펙트럴 가속도 비를 이용하여 수정된 변위를 비교하여 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 PGA로 정규화한 경우 시나리오 지진의 경우 0.2g 입력과 0.5g 입력에서의 변위가 유사하게 나타난 것을 알 수 있다. 또한 0.2g 입력에서 Chi-Chi 지진과 시나리오 지진에 의한 변위가 거의 동일하게 나타났다. 따라서 이러한 변위로 지진입력의 증가에 따른 변위를 직접 비교하는 것은 매우 곤란하다.

스펙트럴 가속도 비를 이용하여 수정한 변위응답에서는 NRC 지진에 의한 응답이 다른 지진에 의한 응답에 비해 매우 크게 나타났으며 근거리지진인 Chi-Chi 지진에 의한 응답이 가장 적게 나타났다. 이러한 결과로 보아 구조물의 진동수가 근거리지진이 크게 영향을 미치는 저진동수 구간을 벗어난 큰 고유진동수를 가질 경우 근거리 지진에 의한 영향이 가속도 응답 뿐 아니라 변위응답에서도 크지 않음을 알 수 있다.

표 4. 구조물 변위응답 비교

| Input Motion | Required PGA(g) | Table PGA (g) | Measured Displacement | Normalized to Required PGA | Normalized by Spectral Ratio |
|--------------|-----------------|---------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------|
| TCU 1D02     | 0.2000          | 0.1735        | 2.7949                | 3.221787                   | 1.982199                     |
| SCE 1D02     | 0.2000          | 0.3006        | 4.7176                | 3.138789                   | 3.714646                     |
| SCE 1D05     | 0.5000          | 0.8455        | 7.5248                | 4.44991                    | 8.33311                      |
| NRC 1D02     | 0.2000          | 0.2470        | 6.8265                | 5.52753                    | 6.320833                     |
| NRC 1D05     | 0.5000          | 0.4886        | 9.2221                | 9.43727                    | 10.7609                      |

변위응답 만으로 구조물의 비선형거동을 판단하는 것은 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 1층 대각선 방향 2개의 기둥에 변형율계를 설치하여 변형율을 측정하였다. 계측하여 얻은 변형율은 변위에서와 마찬가지로 스펙트럴 가속도비를 이용하여 보정하였다. 표 5에 보정된 변형율을 스펙트럴 가속도 비와 함께 보여주고 있다. 일반적으로 구조용 강재의 항복변형율은 0.003으로 볼 수 있으며 따라서 0.5g 이상의 입력지진에서는 입력지진동의 종류에 관계없이 항복 변형율 이상이 됨을 알 수 있다. 입력지진동 종류에 따른 변형율을 보면 NRC 지진에 의한 변형율이 가장크게 나타나났으며 Chi-Chi 지진에 의한 값이 비교적 적게 나타나 변위응답과 동일한 양상을 나타내고 있다.

최대변형율 응답을 기준으로 하여 볼 때 강지진동에 의해 1층 기둥에서 비선형거동이 발생함을 알 수 있으나 랜덤진동 시험에 의한 고유진동수 추정에서 큰 변화가 없음을 보아 큰 변위 발생 후에도 재료적인 특성이 크게 변하지 않았음을 알 수 있다.

표 5. 1층 기둥의 변형율 응답

| Input    | Spectral Ratio | Column #1 | Column #2 | Average Strain |
|----------|----------------|-----------|-----------|----------------|
| TCU 1D02 | 1.4100         | 0.0007    | 0.0008    | 0.0007         |
| TCU 2D02 | 0.9350         | 0.0004    | 0.0009    | 0.0006         |
| SCE 1D02 | 1.2700         | 0.0010    | 0.0014    | 0.0012         |
| SCE 1D05 | 0.9030         | 0.0034    | 0.0041    | 0.0038         |
| SCE 2D02 | 0.9960         | 0.0010    | 0.0014    | 0.0012         |
| SCE 2D05 | 0.6410         | 0.0037    | 0.0045    | 0.0041         |
| SCE 3D05 | 0.6080         | 0.0038    | 0.0046    | 0.0042         |
| NRC 1D02 | 1.0800         | 0.0016    | 0.0023    | 0.0019         |
| NRC 1D05 | 0.8570         | 0.0083    | 0.0111    | 0.0097         |
| NRC 2D02 | 1.0600         | 0.0014    | 0.0019    | 0.0016         |
| NRC 2D05 | 0.7090         | 0.0056    | 0.0083    | 0.0070         |
| NRC 3D05 | 0.7360         | 0.0054    | 0.0080    | 0.0067         |

앞에서는 주로 입력지진동의 종류와 강도에 따른 구조물의 거동을 중심으로 분석하였다. 이상의 분석결과로 볼 때 우리나라 원전 구조물의 설계에 사용하는 표준응답 스펙트럼은 시나리오 지진이나 근거리 지진에 비해 보수적인 결과를 주는 것으로 볼 수 있다. 또한 원전 구조물의 고유진동수가 대부분 4Hz 이상이므로 근거리 지진에 의한 영향 역시 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 구조적인 측면에서 우리나라 원전 구조물은 탄성한계 내에서 비교적 충분한 내진여유도를 가지고 있는 것으로 판단된다.

그러나 원전 구조물 내부에 설치된 기기의 내진안전성에 대한 문제는 구조물의 안전성과는 별개의 문제로 취급하여야 한다. 기기의 파괴는 구조물 내부의 층응답에 의해 지배되며 또한 기기가 설치된 판넬(Panel)이나 캐비닛(Cabinet) 등의 진동 모드와 큰 연관성

을 가지고 있다. 과거에 수행된 우리나라 원전의 지진취약도(Seismic Fragility) 분석에서 나타난 바와 같이 주요 안전관련 기기의 지배적인 파손모드는 기기의 구조적인 파괴 보다는 계전기의 오작동 등에 의한 기능적 파괴로 나타났다. 따라서 이에 대한 검토를 위해서는 구조물 내부의 층응답(Floor Response or In-Structure Response)에 주목할 필요가 있다.

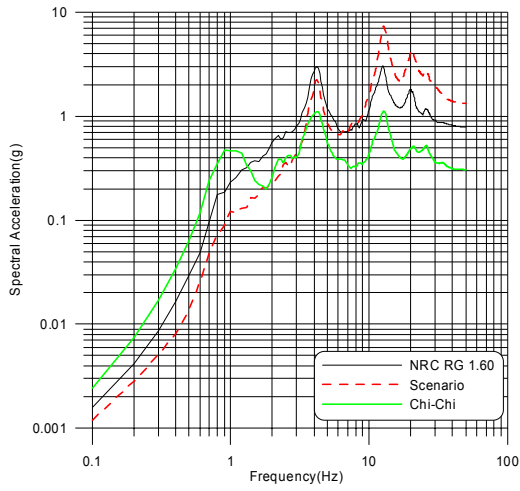
일반적으로 계전기의 오작동과 같은 기기의 기능적 파괴모드는 고진동수 지진동에 매우 민감하다. 특히 계전기가 설치된 판넬이나 캐비넷 등의 국부적인 고진동수 모드에 의해 크게 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 기기의 내진안전성을 평가하기 위한 방편으로 시험에 의한 구조물의 층응답을 평가하였다. 그림 10에 2층 바닥 및 지붕에서의 층응답 스펙트럼을 보여주고 있다. 이들 층응답 스펙트럼은 0.2g 입력을 사용하여 1-D 시험을 수행한 결과로부터 얻은 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 진동수에 따라 층응답의 차이가 크게 발생함을 알 수 있다. 특히 10Hz 이상의 고진동수 영역에서는 시나리오 지진에 의한 층응답이 매우 크게 증폭됨을 알 수 있다.

그림 11에서는 각각의 진동수 대에서의 목표 응답스펙트럼과 진동대 입력 응답스펙트럼의 비를 이용하여 보정한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 스펙트럼 형상은 보정하지 않은 경우와 매우 유사하나 일부 진동수에서의 증폭값은 약간의 차이를 보여주고 있다. 이상의 결과를 종합해 보면 시나리오 지진과 같이 고진동수 특성을 갖는 지진의 경우 구조물 내부에 설치된 기기에 상당히 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있으며, 장주기 특성을 갖는 근거리 지진의 경우 기기에 크게 위협적이지 않음을 알 수 있다.

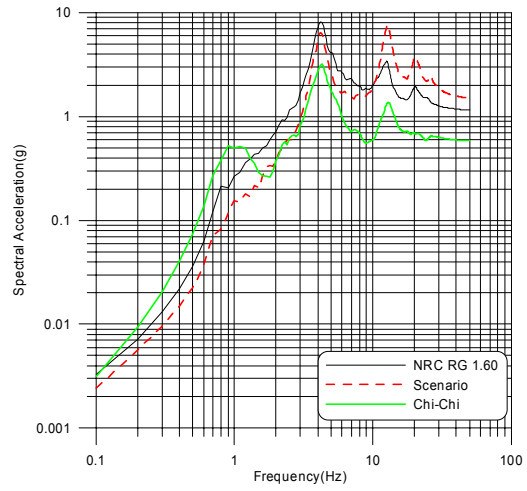
## 5. 결론

본 연구에서는 3세트의 서로 다른 주파수 특성을 가지는 입력지진동을 이용하여 철골 구조물의 진동대 시험을 수행하였다. 시험 결과로부터 얻은 가속도, 변위 및 변형률 응답을 통하여 구조물의 거동 특성을 평가하고 층응답스펙트럼의 분석을 통하여 입력지진동이 구조물 내부에 설치된 기기에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 원전 구조물의 설계에 사용된 표준응답 스펙트럼에 의한 가속도 및 변위응답이 시나리오 지진이나 근거리 지진에 비해 크게 나타나 우리나라 원전 구조물의 경우 탄성한계 내에서는 비교적 내진여유도가 큼을 알 수 있었다.
- 본 실험에서 지진강도가 큰 입력에서는 골재 기둥이 항복점을 초과하는 변형을 일으킨 것으로 판단되나 항복점 이상의 거동을 한 후에도 구조물 본래의 동특성은 보존되는 것으로 나타났다.
- 시나리오 지진과 같이 고진동수 특성이 큰 입력지진은 구조물 내부에 설치된 주요 기기의 내진성능에 크게 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다.
- 설계 지진의 경우 우리나라 지진동 특성인 고진동수 성분이 저평가되어 있을 가능성이 커 이에 대한 대비가 필요하다.
- 본 실험은 철골 구조에 한정된 것으로 콘크리트 구조물과 같이 초기 균형에 의한 강성저하 특성을 갖는 구조물에 대한 근거리 지진의 영향 평가 연구 등이 추가적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

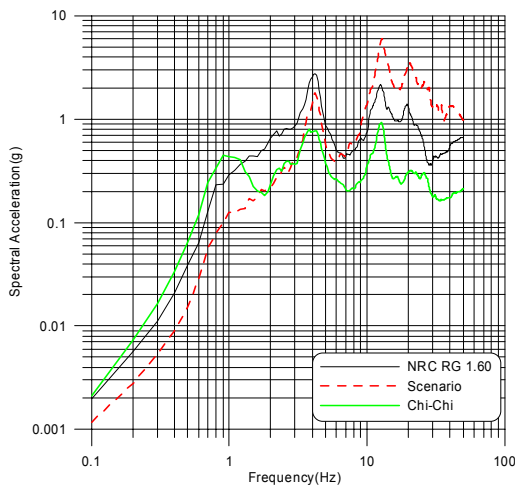


(a) 2nd Floor

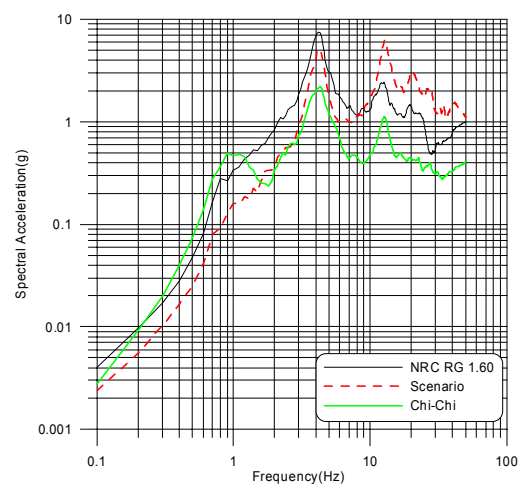


(b) Roof

그림 10. 층응답스펙럼 비교



(a) 2nd Floor



(b) Roof

그림 11. 수정된 층응답스펙럼 비교

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었으며 본 실험을 수행한 한국기계연구원 관계자들에게 감사드립니다.

### 참고문헌

1. US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of

Nuclear Power Plants, 1973.

2. US NRC Regulatory Guide 1.165, Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, 1997.
3. In-Kil Choi, Young-Sun Choun, and Jeong-Moon Seo, "Scenario Earthquakes for Korean Nuclear Power Plant Site Considering Active Faults," SMiRT 17, Prague, Czech Republic, 2003.
4. R. P. Kennedy, S. A. Short, K. L. Merz, F. J. Tokarz, I. M. Idriss, M. S. Power, and K. Sadigh, Engineering Characterization of Ground Motion, NUREG/CR-3805, 1984.
5. J. W. Reed, R. P. Kennedy, and B. Lashkari, Analysis of High-Frequency Seismic Effects, EPRI TR-102470, 1993.